序

DOI:10.12211/2096-8280.2026-122

合成生物学赋能新污染物治理

宋茂勇[1]，唐鸿志[2]，吴晓磊[3]，朱永官[1]
（[1] 中国科学院生态环境研究中心，北京 100086；[2] 上海交通大学生命科学技术学院，上海 200240；[3] 北京大学力学与工程科学学院，北京 100871）

中图分类号：Q81 **文献标志码：**A

Synthetic biology empowers the control of emerging pollutants

SONG Maoyong[1], TANG Hongzhi[2], WU Xiaolei[3], ZHU Yongguan[1]
([1]*Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China*; [2]*School of Life Sciences and Biotechnology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*; [3]*School of Mechanics and Engineering Science, Peking University, Beijing 100871, China*)

全球环境污染呈现传统污染负荷居高不下与新污染风险持续凸显的复合特征，传统环境工程技术难以满足日益复杂的污染治理需求。特别是，天然微生物在实际应用中面临低浓度污染物识别能力有限、降解效率不足、复杂环境适应性差、菌群稳定性低以及生物安全风险等关键瓶颈。

合成生物学提供了变革性技术工具，将环境中的生物元件、代谢途径与微生物群落重新定义为可设计、可重构、可编程的工程系统，推动环境治理从“依赖自然降解”向“基于自然的设计并制造所需功能”的范式跃迁。环境合成生物学利用环境科学与合成生物学的原理和方法，发展针对环境污染物控制与处理的生物传感监测、毒性评价、智能降解和资源化利用等技术，可从以下三个方面为解决复杂环境问题提供重要技术选择。

（1）精准重构降解路径，显著提升传统生物难降解污染物的处理效率

新污染物中大量物质（如全氟化合物、某些抗生素、微塑料）化学稳定性极强，天然微生物往往缺乏针对这些物质的完整代谢通路。利用合成生物学策略可将分散的降解基因模块化组装，在底盘细胞中重建完整路径，实现高效降解。在这种技术路线下，只要目标污染物的降解酶系被鉴定，理论上就可通过路径重构实现新污染物完全降解。例如，为实现对甲苯的完全生物降解，研究人员从3种不同假单胞菌中选取了11个降解基因，在大肠杆菌中组装出完整的七步代谢通路，使工程菌能将甲苯彻底矿化并进入三羧酸循环，而非停留在有毒中间产物阶段。该思路可适用于抗生素、内分泌干扰物等新污染物的末端治理。

（2）设计合成菌群实现协同治理，破解复合污染难题

实际环境中新污染物极少单独存在。例如，印染废水中一般同时存在顽固有机氮与PET微塑料。这些新污染物化学性质天壤之别，单一生物降解平台无法兼顾。为此，合成生物学的应对方案是构建人工分工协作的菌群体系。其核心机制之一是将一种污染物的降解中间体成为另一种污染物的共底物，使协

收稿日期：2026-10-08 修回日期：2026-12-12
引用本文：宋茂勇，唐鸿志，吴晓磊，朱永官. 合成生物学赋能新污染物治理[J]. 合成生物学，2026，7(5)：949-952
Citation：SONG Maoyong，TANG Hongzhi，WU Xiaolei，ZHU Yongguan. Synthetic biology empowers the control of emerging pollutants[J]. Synthetic Biology Journal，2026，7(5)：949-952

同菌群内形成集成生化网络。例如，针对PFAS、阿特拉津和木质素三种性质迥异的污染物，研究人员通过机器学习引导的菌群组装，从2155株环境细菌中筛选出45株有效降解菌，构建的合成菌群实现了90%以上的PFOS、91.6%的木质素和91.4%的阿特拉津同时去除。这种协同效应可突破任何单菌或天然菌群难以实现的瓶颈。

（3）赋能监测与风险评估，提升治理的精准性

新污染物治理行动方案强调“精准治污、科学治污”，其前提是对新污染物进行精准识别与风险研判。利用合成生物学原理和技术可构建和提供高度灵敏和准确的全细胞生物传感器工具。例如，构建污染物响应型启动子与报告基因（如荧光蛋白、电化学活性模块）耦合的工程菌，可在环境样品中特异性“感知”目标污染物并输出可检测信号。这类传感器具有成本低、可现场部署、能反映生物可利用性（而非仅化学浓度）的优势，可补充传统仪器分析在暴露预测与毒性评估方面的不足。

为展示国内外合成生物学在环境领域的最新进展，《合成生物学》特组织“环境合成生物学”专辑，共收录16篇文章，内容覆盖多个研究方向：特色生物资源挖掘，从极地微生物资源开发利用[1]到高效镉转化嗜热四膜虫的理性构建[2]；生物传感与环境监测，内容包括合成生物传感器在重金属、有机物、病原微生物等检测中的应用[3-4]；微生物群落（合成菌群）理性设计，从菌株资源库驱动的互作识别组装到大规模合成群落的鲁棒性机制与设计原则[5-7]；降解与修复技术，包括光催化-生物杂合系统[8-9]、纳米材料/微生物杂合体[10]、脂肽表面活性剂及微生物调控系统在污染物降解中的应用[11-13]；机制解析与模型预测，包括微生物群落尺度代谢模型[14]、微生物组理性设计的关键缺环[15]及细菌胞外DNA的环境生物学功能[16]。

环境合成生物学正处于从经验驱动向理性智能设计跃迁的关键节点。特色生物资源的挖掘、系统整合、人工智能辅助的功能挖掘、微生物合成菌群的定量组装与鲁棒性优化、跨界面电子传递的定向调控、降解代谢路径的完整重构，以及从实验室到开放生境的尺度拓展，将是未来十年的核心方向。

环境合成生物学并非简单地将合成生物学方法移植到环境领域，而是需要直面开放、异质、动态环境带来的独特挑战。发展环境合成生物学，有望为中国环境治理、低碳转型和生物制造提供新的功能资源与技术支撑，推动污染物治理从经验驱动的“简单功能组装”向可预测、可调控的“理性系统设计”转变，为构建高效、稳定、可控的污染治理体系提供理论依据与技术参考。

参 考 文 献

[1] 季晶,张伦源,王正,等. 从“极地探索”到“极地生物制造”: 中国极地微生物资源的开发利用与前景[J]. 合成生物学,2026,7(5):961-981.
JI J, ZHANG L Y, WANG Z,et al. From “polar exploration” to “polar biomanufacturing”: the development, utilization, and prospects of China's polar microbial resources[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):961-981.

[2] 胡凯康,赵曙慧,张晶,等. 高效镉转化嗜热四膜虫的理性设计和构建[J]. 合成生物学,2026,7(5):1287-1306.
HU K K, ZHAO S H, ZHANG J,et al. Rational design and construction of a high-efficiency cadmium-converting *Tetrahymena thermophila* strain[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1287-1306.

[3] 姜瑞琴,田微,刘鸿雁,等. 基于合成生物学的生物传感器: 环境检测新进展[J]. 合成生物学,2026,7(5):982-1017.
JIANG R Q, TIAN W, LIU H Y,et al. Synthetic biology-based biosensors: advances in environmental detection[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):982-1017.

[4] 侯爽,康照琪,刘一东,等. 基于合成生物学的环境污染物传感研究进展[J]. 合成生物学,2026,7(5):1018-1037.
HOU S, KANG Z Q, LIU Y D,et al. Advances in environmental pollutant sensing based on synthetic biology[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1018-1037.

[5] 林慧,赵晞泽,蒋荷,等. 从菌株资源库到合成微生物群落: 理性设计、工程构建和应用[J]. 合成生物学,2026,7(5):1038-1060.
LIN H, ZHAO X Z, JIANG H,et al. From strain resource biobanks to synthetic microbial communities: rational design, engineered assembly, and applications[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1038-1060.

[6] 金潇,王淼啸. 微生物组如何被理性设计?——从互作机制解析到工程微生物组构建的关键缺环与未来展望[J]. 合成生物学,2026,7(5):1061-1090.

JIN X, WANG M X. How can microbiomes be rationally designed? —Bridging the gaps from interaction mechanisms to microbiome engineering [J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1061-1090.

[7] 齐泮晴,刘学文,吴梦迪,等. 面向应用的合成微生物群落鲁棒性及设计原则[J]. 合成生物学,2026,7(5):1091-1106.
QI P Q, LIU X W, WU M D,et al. Robustness and design principles of synthetic microbial communities for application[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1091-1106.

[8] 朱俊羿,肖婧,王少杰,等. 逆 β-氧化途径工程化:从有机废弃物到中链脂肪酸[J]. 合成生物学,2026,7(5):1202-1225.
ZHU J Y, XIAO J, WANG S J,et al. Engineering of reverse β-oxidation (RBO) pathway: converting organic waste into medium-chain fatty acids[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1202-1225.

[9] 姚智凯,陈乐天,谭小萍,等. 光催化-生物杂合系统强化污染物降解的研究进展:从功能组装到理性设计[J]. 合成生物学,2026,7(5):1107-1124.
YAO Z K, CHEN L T, TAN X P,et al. Advances in enhanced pollutant degradation by photocatalysis-biohybrid systems: from functional assembly to rational design[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1107-1124.

[10] 刘宇晖,周思志,陈曼,等. 纳米材料-微生物杂合体在环境领域的原理及应用[J]. 合成生物学,2026,7(5):1125-1149.
LIU Y H, ZHOU S Z, CHEN M, et al. Principles and applications of nanomaterial-microorganism hybrids in the environmental field[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1125-1149.

[11] 张亦桑,尚维,丁明珠,等. 合成生物技术强化脂肽表面活性剂环境修复进展[J]. 合成生物学,2026,7(5):1173-1201.
ZHANG Y S, SHANG W, DING M Z, et al. Recent advances in synthetic biology-intensified lipopeptide biosurfactants for environmental pollution remediation[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1173-1201.

[12] 肖存镕,修静怡,谢尚县. 微生物调控系统在污染物降解中的研究与应用[J]. 合成生物学,2026,7(5):1150-1172.
XIAO C R, XIU J Y, XIE S X. Research and application of microbial regulation system in pollutant degradation[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1150-1172.

[13] 杜娅茹,袁红莉,杨金水. 环境信号驱动的真核微藻代谢调控与绿色应用[J]. 合成生物学,2026,7(5):1226-1242.
DU Y R, YUAN H L, YANG J S. Environmental signal-driven regulation of eukaryotic microalgal metabolism and its green applications[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1226-1242.

[14] 马帅,臧嘉熹,刘舒月,等. 微生物群落尺度代谢模型研究进展[J]. 合成生物学,2026,7(5):1243-1260.
MA S, ZANG J X, LIU S Y,et al. Advances in microbial community-scale metabolic models[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1243-1260.

[15] 孙艳鑫,王世龙,俞胜男,等. 工程化核酶介导的 RNA 信息记录技术解析微生物群落中的水平基因转移[J]. 合成生物学,2026,7(5):953-960.
SUN Y X, WANG S L, YU S N,et al. Ribozyme-enabled RNA recording for analyzing mobile genetic element-host associations in microbial communities[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):953-960.

[16] 张保财,李腾,郭云雪,等. 细菌胞外 DNA 释放机制、功能及环境生物学应用[J]. 合成生物学,2026,7(5):1261-1286.
ZHANG B C, LI T, GUO Y X,et al. Release mechanism, function, and application in environmental biology of bacterial extracellular DNA [J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(5):1261-1286.



宋茂勇(1978—)，男，中国科学院生态环境研究中心研究员，博士生导师。研究方向为新污染的分析方法、环境过程与健康危害。国家杰出青年科学基金、国家优秀青年科学基金获得者，国家重点研发计划首席科学家，国家生态环境保护委员会委员。在 *Nat. Water*、*Sci. Adv.* 、*PNAS*、*JACS*、*ES&T* 等杂志发表论文 180 多篇。获中科院杰出科技成就奖(集体)、环境保护科学技术二等奖等奖励，担任 ACS 期刊 *Environment & Health* 杂志副主编。
E-mail：mysong@rcees. ac. cn



唐鸿志(1980—)，男，上海交通大学特聘教授，博士生导师。研究方向为环境污染物的微生物降解及合成生物学。国家杰出青年科学基金、国家优秀青年科学基金、上海市青年科技启明星获得者，国家重点研发计划首席科学家。以通讯或第一作者在 *Nature*、*Nat. Commun.* 、*Cell Discov.* 、*The Innovation*、*Mol. Microbiol.* 、*mBio*、*Environ. Microbiol.* 、*J. Biol. Chem.* 等发表论文 70 多篇。获教育部自然科学一等奖(2016)和教育部技术发明二等奖(2022)等奖励。
E-mail：tanghongzhi@sjtu. edu. cn



吴晓磊（1968—），男，北京大学教授，博士生导师。研究方向为合成微生物组理性设计、智能构建与应用等。教育部长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者，国家重点研发计划首席科学家。主持合成生物学重大专项重点研发计划项目、国家自然科学基金委重点基金、重大国际合作等项目或课题近60项。在*Nat. Water*、*Nat. Commun.*、*PNAS*、*Cell Systems*、*Cell Rep.*、*Microbiome*等杂志发表论文220多篇，申请或获得国家发明专利40项，美国发明专利1项，产业转化专利1项。
E-mail：xiaolei_wu@pku. edu.cn



朱永官（1967—），中国科学院生态环境研究中心研究员，博士生导师，中国科学院院士，发展中国家科学院院士。研究方向为土壤-植物-微生物相互作用与生源要素\污染物的循环与转化，土壤-植物系统污染的生态和健康效应。在*Science*、*Nature*及其子刊，*PNAS*、*ES&T*等刊物发表学术论文500余篇。获国家自然科学二等奖（2009、2023）、国际土壤科学联合会李比希奖（2022）、何梁何利基金科学与技术进步奖（2025）等奖励。
E-mail：ygzhu@rcees.ac.cn